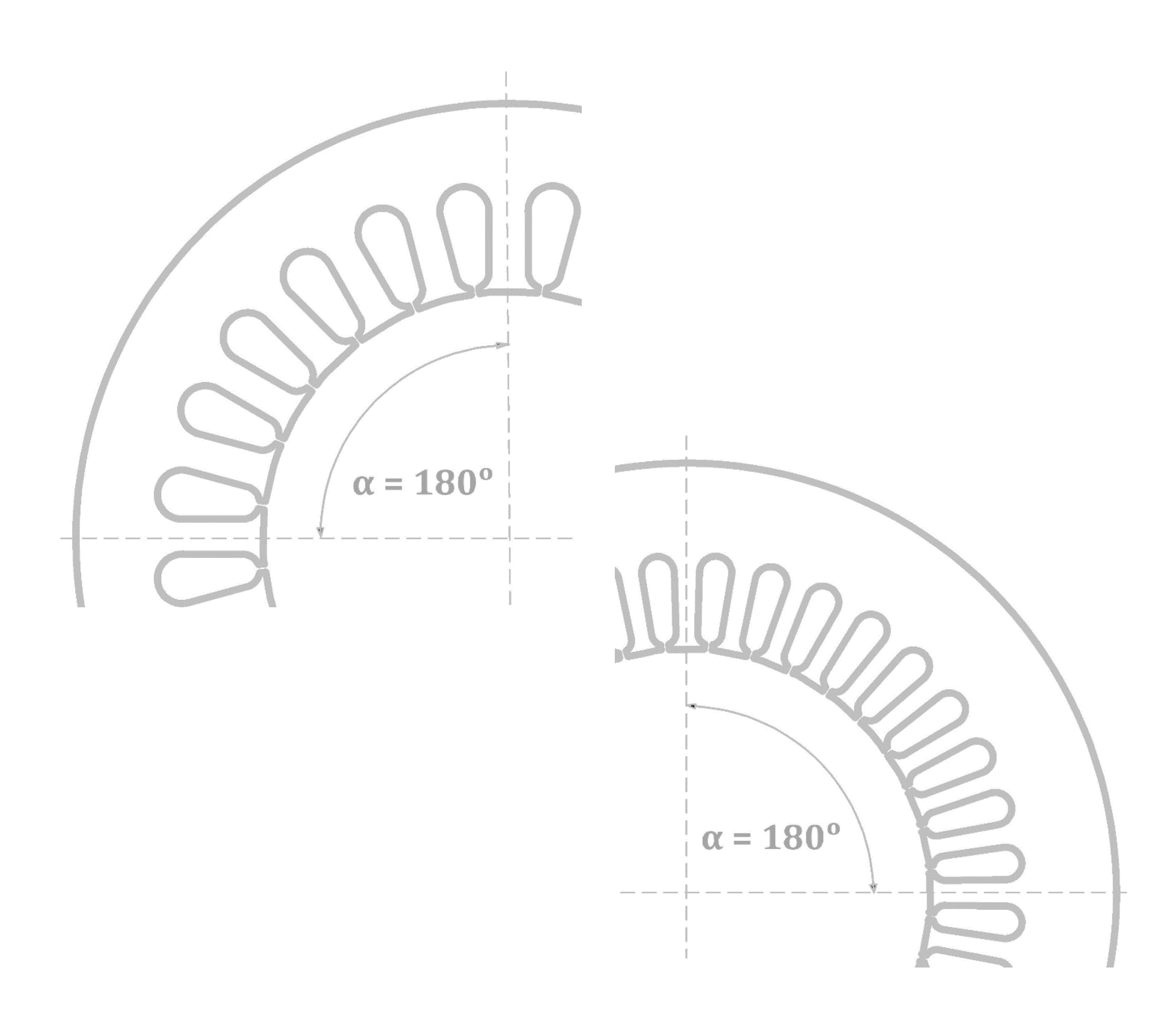
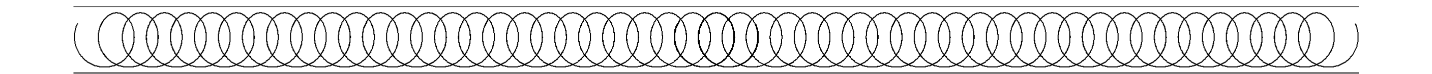
Расчет синусной обмотки

Подсчет распределения витков по пазам в распределенной обмотке
трехфазного, однофазного асинхронного электродвигателя
в соответствии с формой синусной кривой магнитного поля полюса.

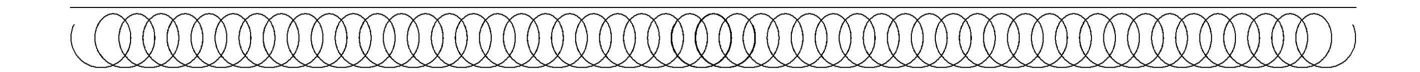


Rev. 07 29 August 2025



автор Колосков Юрий Валерьевич

Для инженеров, мастеров, рабочих занятых на производстве ремонта электрических асинхронных двигателей. Практический расчет распределения витков по пазам при создании так называемой синусной обмотки. В брошюре не рассматриваются основные правила построения или расчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте и поэтому предназначена для подготовленного читателя. Будет полезна учащимся учебных заведений.



Синусная обмотка выполнима только при концентрической обмотке, улучшает и исправляет формирование формы магнитных линий полюса, приближает форму магнитных линий к синусоиде, позволяет устранить или ослабить влияние вредных гармоник, улучшает производительность электродвигателя. Синусные обмотки применяются в электродвигателях переменного тока. Ниже представлен простой метод расчета. Способ подсчета позволяет преобразовать синусоидальную функцию из геометрической фигуры в численное значение. Кривая на рисунке 1 представляет синусоидальную форму магнитодвижущей силы под каждым полюсом. Абсцисса представляет собой электрическую степень *αn* половины шага *yn* каждой катушки, а ордината представляет собой электрическое значение синусоидальной функции $sin\alpha_n$, соответствующее углу. Таким образом, используя кривую синусоидальной функции, можно рассчитать количество витков катушки в каждом пазе. Количество витков катушечной группы каждого полюса синусоидальной обмотки следует рассматривать как 100%, затем рассчитывается соотношение количества витков каждой катушки в соответствии со значением синусоиды половинного шага каждой катушки и наконец количество витков каждой катушки. Синусная обмотка выполнима только при q, пазов на полюс и фазу, равным или больше двух, $q \geq 2$, для трехфазных электродвигателей только при определенном соотношении пазов статора и полюсов с учетом общих правил построения симметричных обмоток.

Суть метода заключается в определении угла каждой катушки, преобразовании угла в значение синуса, суммирование значений синуса и нахождение распределения витков по пазам. Расположение катушек различается в пазах двумя видами. Расположение наибольших (внешних) катушек совместно в одном пазе, и рядом в двух пазах, как показано на рисунке 2 и 3. Поименованных соответственно тип *A* и тип *B*. Подсчет для обоих видов несколько, незначительно, различается в подсчете сумм синусов углов, что будет показано в дальнейших примерах.

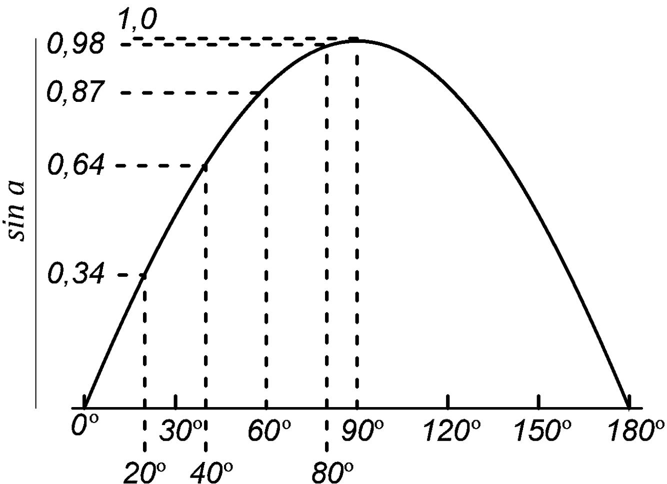


Рис. 1. Идеальная, теоретическая синусоидальная форма магнитного поля полюса асинхронного электродвигателя.

Пример 1, вариант расположения "*B*", рис. 2. Двухполюсный, $2p = 2$ однофазный асинхронный двигатель с 18 пазами, $Z = 18$, $q = 4$ (пазов на полюс и фазу), шаг наибольшей катушки $y = 1 - 9$, количество витков катушечной группы каждого полюса равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазу. Электрический угол занимаемый каждым пазом:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 2}{18} = \frac{360}{18} = 20°$$

Электрический угол, занимаемый половиной шага *yn* (*y* – шаг, *n* – номер катушки), равен:

$$\alpha_n = \frac{y_n}{2} \times \alpha$$

где y_n – шаг отдельной катушки катушечной группы.

Следовательно, электрический угол (см. рис. 2):

угол паза катушки 1, от 4 до 6 паза (шаг 2): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{2}{2} \times 20° = 20°$

угол паза катушки 2, от 3 до 7 паза (шаг 4): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{4}{2} \times 20° = 40°$

угол паза катушки 3, из паза 2 в паз 8 (шаг 6): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{6}{2} \times 20° = 60°$

угол паза катушки 4, из паза 1 в паз 9 (шаг 8): $\alpha_4 = \frac{y_4}{2} \times \alpha = \frac{8}{2} \times 20° = 80°$

В соответствии с синусоидальной кривой, показанной на рис. 1 и 2, значение синусоидальной функции $sin\alpha_n$, соответствующее каждой катушке, подсчитывается отдельно:

sin 20° = 0,342, sin 40° = 0,642, sin 60° = 0,866, sin 80° = 0,985

Сумма синусных значений катушек составляет:

0,342 + 0,642 + 0,866 + 0,985 = 2,835

Соответствующая доля или процент витков каждой катушки от общего числа витков катушечной группы составит:

$$\text{катушка 1 (шаг } 4-6) = \frac{0,342}{2,835} = 0,1206 \text{ или} \approx 12\%$$

$$\text{катушка 2 (шаг } 3-7) = \frac{0,642}{2,835} = 0,2265 \text{ или} \approx 22,7\%$$

$$\text{катушка 3 (шаг } 2-8) = \frac{0,866}{2,835} = 0,3055 \text{ или} \approx 30,6\%$$

$$\text{катушка 4 (шаг } 1-9) = \frac{0,985}{2,835} = 0,3472 \text{ или} \approx 34,7\%$$

Умножая общее количество витков катушечной группы на соответствующий коэффициент получим реальное количество витков для каждой катушки. Например, сумма витков катушечной группы N = 34 (в одной катушке) × 4 = 136, тогда количество витков первой катушки (наименьшая по размеру катушка в группе) 136 × 0,1206 = 16,4, второй 136 × 0,2265 = 30,8, третьей 136 × 0,3055 = 41,5, и четвертой (наибольшая по размеру катушка в группе) 136 × 0,3472 = 47,2 витков. Этот пример соответствует в таблице 1 готовых значений при шаге наибольшей катушки 8 (1 – 9) и 4 катушкам в группе при укладке типа "*B*" ($y = 8$, q = 4, тип *B*) где группа из 4 катушек занимает 9 пазов и соседние катушки с наибольшим шагом лежат в разных соседних пазах (рис. 2). Так как часть витка намотать не возможно, полученные значения округляются до целого числа, при этом сумма найденных витков должна совпадать с общей суммой (до распределения витков), то есть в данном примере: 16 + 31 + 41 + 48 = 136.
Расположение катушек типа *B*, в выше приведенном примере расчета, показано на рисунке 2. Шаг самой большой катушки меньше диаметрального шага на один паз. В центре полюса (90°) нет паза с двумя сторонами соседних катушек.

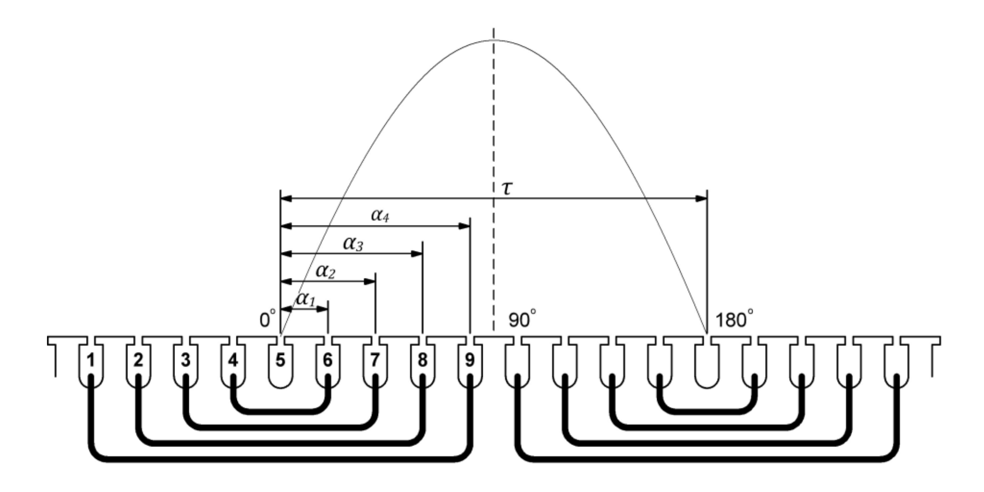


Рис. 2. Расположение обмотки типа *B*.

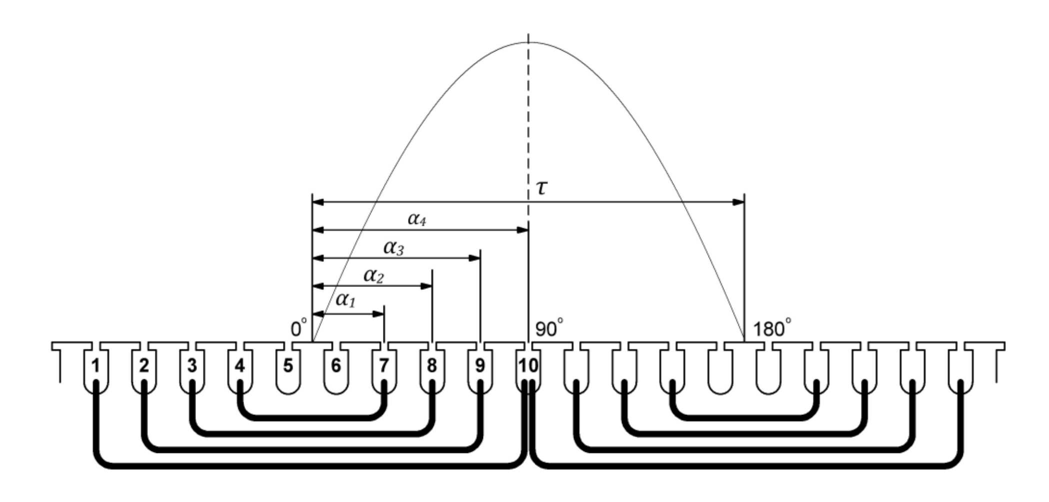


Рис. 3. Расположение обмотки типа *A*.

Пример 2, вариант расположения катушек "*B*" (как на рис. 2, но без малой катушки). Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель с 36 пазами, q = 3, шаг наибольшей катушки y = 1 – 9, количество витков каждой катушечной группы = N, найдем количество витков катушек в каждом пазу при синусоидальном распределении. Электрический угол занимаемый каждым пазом статора:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 4}{Z} = \frac{720°}{36} = 20°$$

Электрический угол, занимаемый половиной шага *yn* (*y* – шаг, *n* – номер катушки), равен:

$$\alpha_n = \frac{y_n}{2} \times \alpha$$

где y_n – шаг отдельной катушки полюса.

Следовательно, электрический угол (см. так же рис. 1):

угол паза катушки 1, от 3 до 7 паза (шаг 4): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{4}{2} \times 20° = 40°$

угол паза катушки 2, от 2 до 8 паза (шаг 6): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{6}{2} \times 20° = 60°$

угол паза катушки 3, из паза 1 в паз 9 (шаг 8): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{8}{2} \times 20° = 80°$

В соответствии с синусоидальной кривой, показанной на рис. 1, значение синусоидальной функции $sin\alpha_n$, соответствующее каждой катушке, подсчитывается отдельно:

$$sin\ 40° = 0{,}642,\ sin\ 60° = 0{,}866,\ sin\ 80° = 0{,}985$$

Сумма синусных значений составляет:

$$0{,}642 + 0{,}866 + 0{,}984 = 2{,}493$$

Соответствующий процент витков каждой катушки от общего числа витков группы составит:

$$\text{катушка 1, малая (шаг } 3 - 7) = \frac{0{,}642}{2{,}493} = 0{,}257 \text{ или } \approx 25{,}7\%$$

$$\text{катушка 2, средняя (шаг } 2 - 8) = \frac{0{,}866}{2{,}493} = 0{,}347 \text{ или } \approx 34{,}8\%$$

$$\text{катушка 3, большая (шаг } 1 - 9) = \frac{0{,}984}{2{,}493} = 0{,}3947 \text{ или } \approx 39{,}5\%$$

проверка суммы: 25,7 + 34,8 + 39,5 = 100%

Предположим общее количество витков катушечной группы N = 16 витков в каждой катушке × 3 = всего 48 витков в катушечной группе. И соответствующее распределение витков в катушках группы согласно полученному результату расчета:

катушка малая 48 × 0,257 = 12,33
катушка средняя 48 × 0,348 = 16,7
катушка большая 48 × 0,395 = 18,96

Так как часть витка намотать невозможно, принимаем окончательно: 12, 17, 19 (что в сумме равно 48). Этот пример распределения в процентах соответствует строке $y = 8$, $q = 3$, тип "B" в таблице 1 готовых значений (8 – 3B). Следует заметить, что точное распределение витков не всегда возможно, особенно если их количество невелико или наоборот - велико и по причине недостатка места в пазе для размещения повышенного количества витков по отношению к нормальному их количеству. В этом случае распределение принимается по возможности и с учетом простой симметрии от центра полюса (90°).

Как показано на рисунке 3, при расположении катушек типа A, шаг самой большой катушки в группе концентрических катушек равен диаметральному шагу, поэтому крайние большие катушки двух соседних групп будут размещаться в центре полюса в пазе вместе. Укладка катушек в пазе, в этом случае, представляет собой двухслойную обмотку (для однофазных двигателей или одно- двухслойную).

Пример 3. Вариант расположения "A" (катушки в серединном пазе вместе, как на рис. 3 и рис. 4). 4-х полюсный асинхронный двигатель с 48 пазами, $q = 4$, шаг наибольшей катушки $y = 1 – 13$, количество витков обмотки каждого полюса равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол занимаемый каждым пазом статора:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 4}{Z} = \frac{720°}{48} = 15°$$

Пример полюса на рисунке 4. Следовательно, электрический угол:

угол паза катушки 1, от 4 до 10 паза (шаг 6): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{6}{2} \times 15° = 45°$

угол паза катушки 2, от 3 до 11 паза (шаг 8): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{8}{2} \times 15° = 60°$

угол паза катушки 3, от 2 до 12 паза (шаг 10): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{10}{2} \times 15° = 75°$

угол паза катушки 4, от 1 до 13 паза (шаг 12): $\alpha_4 = \frac{y_4}{2} \times \alpha = \frac{12}{2} \times 15° = 90°$

В соответствии с синусоидальной кривой, показанной на рис. 1, значение синусоидальной функции $sin\alpha_n$, соответствующее каждой катушке, подсчитывается отдельно:

sin 45° = 0,707, *sin* 60° = 0,866, *sin* 75° = 0,966, *sin* 90° = 1/2 = 0,5

Так как в одном пазе две стороны катушек лежат вместе, для правильного распределения витков значение синуса наибольшей по размеру катушки 90° необходимо разделить на 2, то есть 1 разделить на 2 = 0,5. Так как при таком расположении типа "*B*" стороны катушек всегда будут в центре электрического угла 90° и соответственно синус 90° = 1 и 1/2 = 0,5 это значение будет всегда при любом q и шаге при этом типе укладки обмотки, см. рис. 4.

Примечание. Разделение на 2 справедливо только для однофазных или одно-двухслойной обмотки. При полностью двухслойной обмотке это правило не применимо.

Сумма синусных значений группы катушек составляет:

0,707 + 0,866 + 0,966 + 0,5 = 3,039

Соответствующий процент витков каждой катушки от общего числа витков группы составит:

$$\text{катушка 1 } (4 - 10) = \frac{0,707}{3,039} = 0,2326 \text{ или } \approx 23,3\%$$

$$\text{катушка 2 } (3 - 11) = \frac{0,866}{3,039} = 0,2849 \text{ или } \approx 28,5\%$$

$$\text{катушка 3 } (2 - 12) = \frac{0,966}{3,039} = 0,3178 \text{ или } \approx 31,8\%$$

$$\text{катушка 4 } (1 - 13) = \frac{0,5}{3,039} = 0,1645 \text{ или } \approx 16,4\%$$

проверка суммы 23,3 + 28,5 + 31,8 + 16,4 = 100%

Этот пример соответствует строке y = 12, q = 4, тип "*A*" (12 – 4А) в таблице 1 готовых значений. Предположим общее количество N витков катушечной группы: 72 витка в одной катушке × 4 = во всей группе 288, распределение витков:

малая катушка 288 × 0,233 = 67,1
288 × 0,285 = 82,1
288 × 0,318 = 91,6
наибольшая по размеру катушка 288 × 0,164 = 47,2

Количество витков округляется до целого числа, например 67, 82, 92, 47. При этом в совместном расположении сторон больших катушек в одном пазе 13 будет 47 × 2 = 94 витка (рис. 4). Что демонстрирует принцип образования синусной обмотки, в центре наибольшее количество витков с убыванием количества витков к краям полюса.

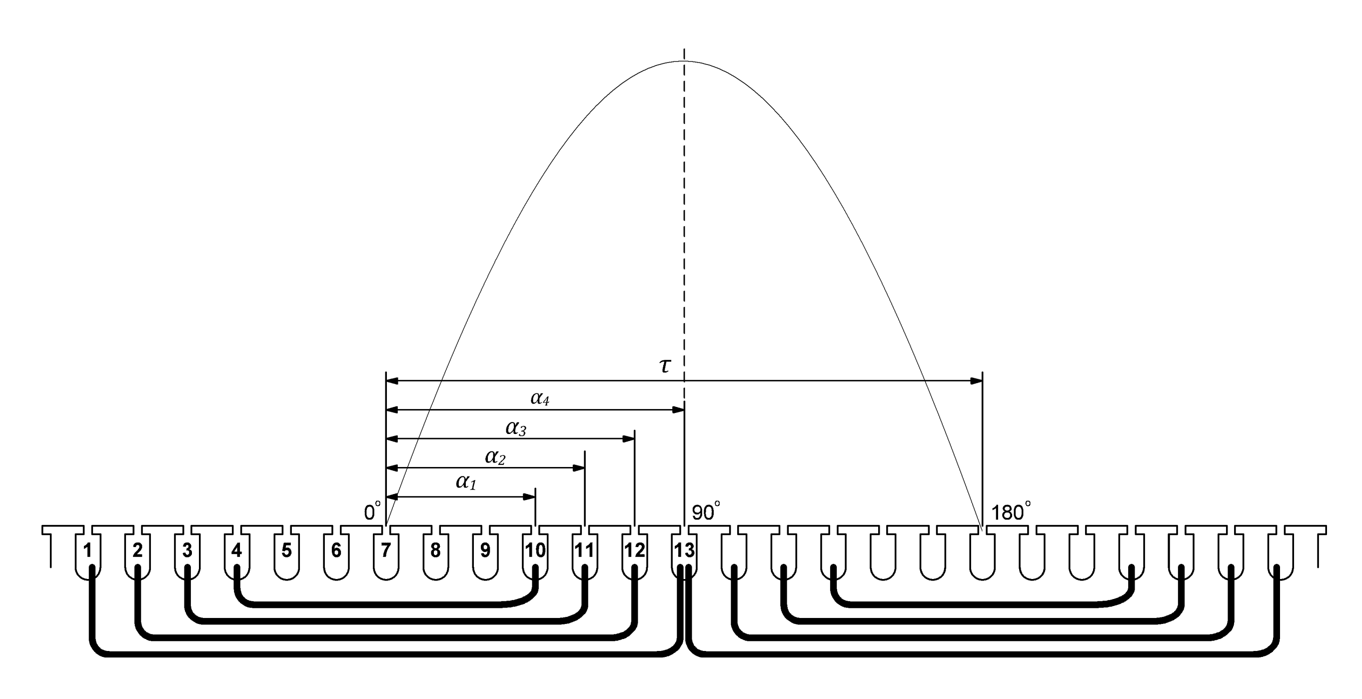


Рис. 4. К примеру 3.

Пример 4. Вариант расположения "*A*" (катушки в серединном пазе вместе, как на рис. 3 и рис. 5). Шестиполюсный асинхронный двигатель с 36 пазами, q = 2, шаг наибольшей катушки y = 1 – 7, количество витков катушечной группы каждого полюса равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол занимаемый каждым пазом в статоре:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 6}{Z} = \frac{1080°}{36} = 30°$$

Пример полюса на рисунке 5, электрический угол:

угол паза катушки 1, от 2 до 6 паза (шаг 4): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{4}{2} \times 30° = 60°$

угол паза катушки 2, от 1 до 7 паза (шаг 6): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{6}{2} \times 30° = 90°$

В соответствии с синусоидальной кривой, показанной на рис. 1, значение синусоидальной функции $sin\alpha_n$, соответствующее каждой катушке подсчитывается отдельно:

sin 60° = 0,866, sin 90° = 1/2 = 0,5

Так как в одном пазе две стороны катушек лежат вместе, для правильного распределения витков значение синуса наибольшей по размеру катушки 90° необходимо разделить на 2, то есть 1 разделить на 2 = 0,5. Так как при таком расположении типа *B* стороны катушек всегда будут в центре с электрически углом 90° и соответственно синус 90° = 1 и 1/2 = 0,5 это значение будет всегда при любом q и шаге при этом типе укладки обмотки. См. примечание в примере 3.

Сумма синусоидальных значений группы катушек составляет:

0,866 + 0,5 = 1,366

Соответствующее распределение витков каждой катушки от общего числа витков полюса составит:

$$\text{катушка 1 } (2-6) = \frac{0{,}866}{1{,}366} = 0{,}6339 \text{ или } \approx 63{,}4\%$$

$$\text{катушка 2 } (1-7) = \frac{0{,}5}{1{,}366} = 0{,}366 \text{ или } \approx 36{,}6\%$$

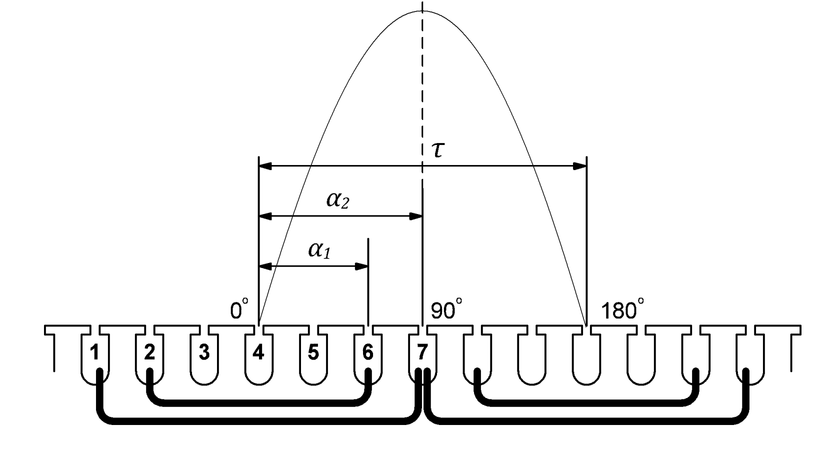
проверка, сумма 63,4 + 36,6 = 100%

Этот пример соответствует строке $y = 6$, $q = 2$, тип "A" (6 – 2А) в таблице 1 готовых значений. Предположим общее количество N витков катушечной группы 28 витков в одной катушке × 2 = 56 в катушечной группе и распределение витков:

малая катушка 56 × 0,634 = 35,5
большая катушка 56 × 0,366 = 20,5

Количество витков округляется до целого числа, например 35 и 21 (в сумме 56). При этом, в совместном расположении сторон больших катушек в одном пазе 7 будет 21 × 2 = 42 витка (рис. 5). Что демонстрирует принцип образования синусной обмотки, в центре полюса наибольшее количество витков с убыванием их количества к краям, соответственно в пазе 6 – 35 витков, паз 7 – 42 витка, паз 8 – 35 витков (рис. 5).

Рис. 5. К примеру 4.



Пример 5 (рис. 6). Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель с 36 пазами, $q = 3$, средний шаг соответствует диаметральному ($y = 9$), шаг наибольшей катушки $y = 1 – 12$, обмотка однослойная, катушечные группы не лежат рядом в пазах, количество витков обмотки каждого полюса равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол занимаемый каждым пазом статора:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 4}{Z} = \frac{720°}{36} = 20°$$

Пример полюса на рисунке 6. Следовательно, электрический угол:

угол паза катушки 1, от 3 до 10 паза (шаг 7): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{7}{2} \times 20° = 70°$

угол паза катушки 2, от 2 до 11 паза (шаг 9): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{9}{2} \times 20° = 90°$

угол паза катушки 3, от 1 до 12 паза (шаг 11): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{11}{2} \times 20° = 110°$

Значение синуса каждой катушки:

$\sin 70° = 0{,}9396$, $\sin 90° = 1$, $\sin 110° = 0{,}9396$

Сумма синусных значений группы катушек составляет (см. рис. 6):

$$0{,}9396 + 1 + 0{,}9396 = 2{,}8792$$

$$\text{катушка 1 } (3-10) = \frac{0{,}9396}{2{,}8792} = 0{,}3263 \text{ или } \approx 32{,}6\%$$

$$\text{катушка 2 } (2-9) = \frac{1}{2{,}8792} = 0{,}3473 \text{ или } \approx 34{,}7\%$$

$$\text{катушка 3 } (1-12) = \frac{0{,}9396}{2{,}8792} = 0{,}3263 \text{ или } \approx 32{,}6\%$$

проверка, сумма 32,6 + 34,7 + 32,6 = 99,9%

Предположим общее количество N витков катушечной группы 32 витка в одной катушке × 3 = 66 в катушечной группе и распределение витков:

малая катушка 96 × 0,3263 = 31,32
средняя катушка 96 × 0,3473 = 33,34
большая катушка 96 × 0,3263 = 31,32

Примем соответственно 31, 34, 31. Этого примера нет в таблице готовых значений. И те значения которые в ней приведены не годятся для рассмотренного случая в этом примере. Так как в таблице даны примеры для совместного расположения соседних катушечных групп рядом (обмотка одно – двухслойная или однофазная) или наибольших катушек в одном пазу, здесь надо быть внимательным, и обратите внимание синус угла 90° здесь не нужно делить пополам, как при варианте расположения *А*.

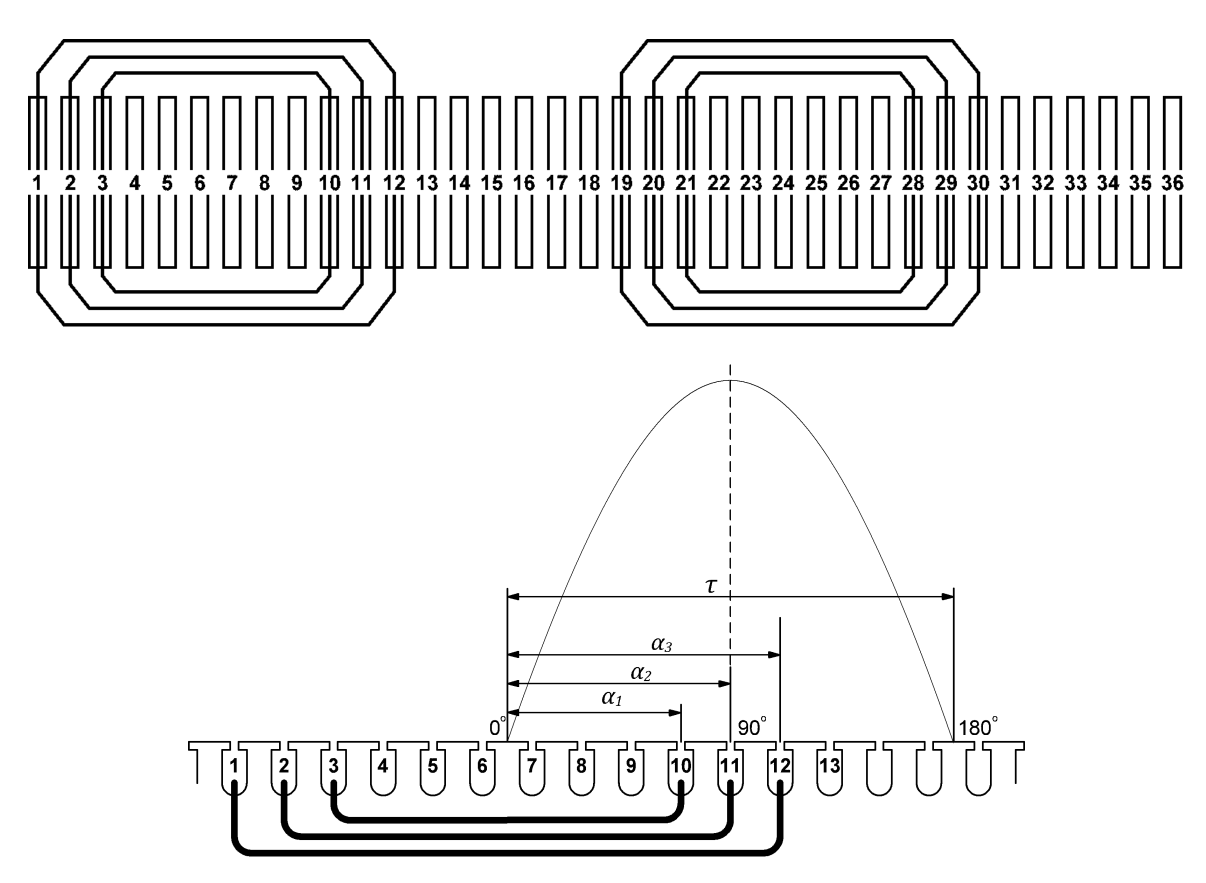


Рис. 6. К примеру 5. $2p = 4$, $Z = 36$, $q = 3$, средний шаг равен диаметральному, показаны катушки одной фазы.

Пример 6 (рис. 7). Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель с 24 пазами, q = 4, средний шаг соответствует диаметральному (y = 12), шаг наибольшей катушки y = 1 – 16, обмотка однослойная, катушечные группы не лежат рядом в пазах, количество витков полюсной группы каждого полюса равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол занимаемый каждым пазом:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 2}{Z} = \frac{360°}{24} = 15°$$

Пример полюса на рисунке 6. Следовательно, электрический угол:

катушка 1, от 4 до 13 паза (шаг 9): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{9}{2} \times 15° = 67{,}5°$

катушка 2, от 3 до 14 паза (шаг 11): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{11}{2} \times 15° = 82{,}5°$

катушка 3, от 2 до 15 паза (шаг 13): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{13}{2} \times 15° = 97{,}5°$

катушка 4, от 1 до 16 паза (шаг 15): $\alpha_4 = \frac{y_4}{2} \times \alpha = \frac{15}{2} \times 15° = 112{,}5°$

Значение синуса соответствующее каждой катушке:

sin 67,5° = 0,9238, sin 82,5° = 0,9914, sin 97,5° = 0,9914, sin 112,5° = 0,9238

Сумма синусных значений группы катушек составляет:

0,9238 + 0,9914 + 0,9914 + 0,9238 = 3,8304

Распределение:

$$\text{катушка 1 } (4-13) = \frac{0{,}9238}{3{,}8304} = 0{,}2411 \text{ или } \approx 24{,}1\%$$

$$\text{катушка 2 } (3-14) = \frac{0{,}9914}{3{,}8304} = 0{,}2588 \text{ или } \approx 25{,}9\%$$

$$\text{катушка 3 } (2-15) = \frac{0{,}9914}{3{,}8304} = 0{,}2588 \text{ или } \approx 25{,}9\%$$

$$\text{катушка 4 } (1-16) = \frac{0{,}9238}{3{,}8304} = 0{,}2411 \text{ или } \approx 24{,}1\%$$

проверка, сумма 24,1 + 25,9 + 25,9 + 24,1 = 100%

Предположим общее количество N витков катушечной группы 18 витков в одной катушке × 4 = 72 в катушечной группе и распределение витков:

1 малая катушка 72 × 0,241 = 17,35
2 катушка 72 × 0,259 = 18,64
3 катушка 72× 0,259 = 18,64
4 большая катушка 72 × 0,241 = 17,35

Соответственно примем: паз 4 и 13 – 17 витков, паз 3 и 14 – 19 витков, 2 и 15 – 19 витков, паз 1 и 16 – 17 витков (рис. 7).

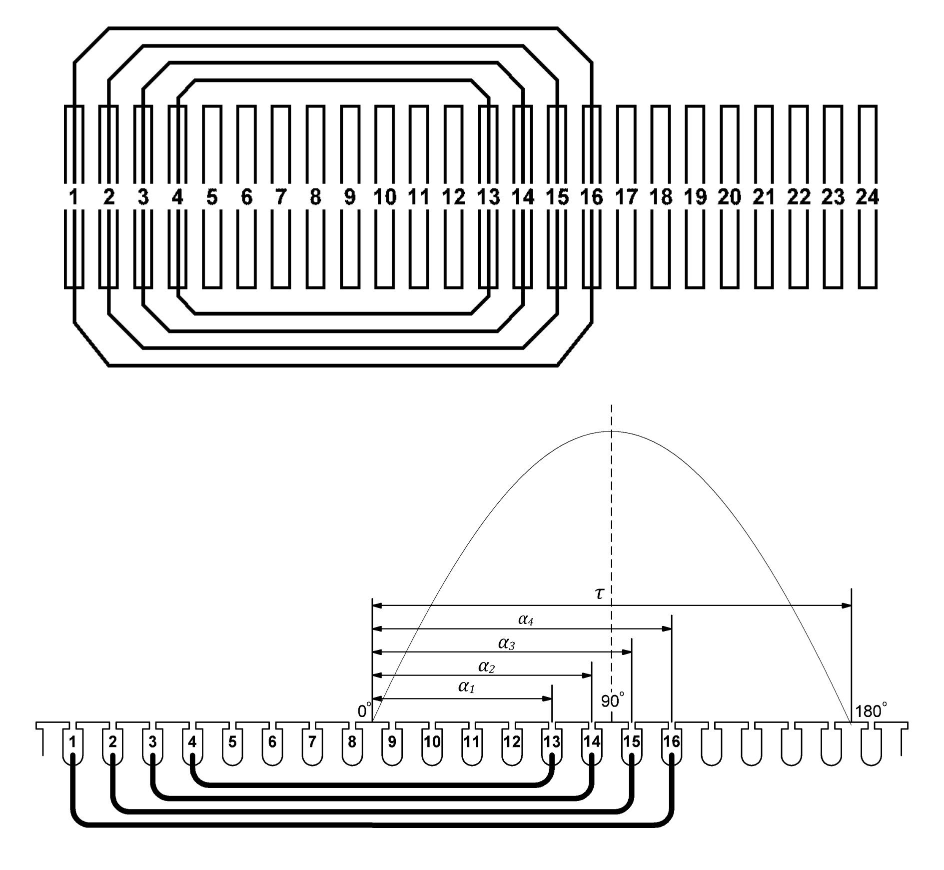


Рис. 7. К примеру 6. $2p$ = 2, Z = 24, q = 4,
средний шаг равен диаметральному, показаны катушки одной фазы.

Пример 7 (рис. 8). Четырехполюсный трехфазный двигатель, обмотка двухслойная, Z = 48, $2p$ = 4, q = 4, средний шаг укороченный y = 10 (диаметральный 12). Две катушки полюсной группы лежат совместно в двух пазах, см. рис. 8, количество витков катушечной группы равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол, занимаемый каждым пазом:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 4}{Z} = \frac{720°}{48} = 15°$$

Пример полюса на рисунке 8. Электрический угол каждой катушки:

катушка 1, от 4 до 11 паза (шаг 7): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{7}{2} \times 15° = 52{,}5°$

катушка 2, от 3 до 12 паза (шаг 9): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{9}{2} \times 15° = 67{,}5°$

катушка 3, от 2 до 13 паза (шаг 11): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{11}{2} \times 15° = 82{,}5°$

катушка 4, от 1 до 14 паза (шаг 13): $\alpha_4 = \frac{y_4}{2} \times \alpha = \frac{13}{2} \times 15° = 97{,}5°$

Значение синуса соответствующее каждой катушке:

sin 52,5° = 0,7933, sin 67,5° = 0,9238, sin 82,5° = 0,9914, sin 97,5° = 0,9914

Сумма синусоидальных значений группы катушек составляет:

0,7933 + 0,9238 + 0,9914 + 0,9914 = 3,6999

Значение распределения по пазам:

$$\text{катушка 1 } (4-11) = \frac{0{,}7933}{3{,}6999} = 0{,}2144 \text{ или } \approx 21{,}4\%$$

$$\text{катушка 2 } (3-12) = \frac{0{,}9238}{3{,}6999} = 0{,}2496 \text{ или } \approx 25\%$$

$$\text{катушка 3 } (2-13) = \frac{0{,}9914}{3{,}6999} = 0{,}2679 \text{ или } \approx 26{,}8\%$$

$$\text{катушка 4 } (1-14) = \frac{0{,}9914}{3{,}6999} = 0{,}2679 \text{ или } \approx 26{,}8\%$$

проверка, сумма 21,4 + 25 + 26,8 + 26,8 = 100%

Предположим общее количество N витков катушечной группы 16 витков в одной катушке × 4 = 64 в катушечной группе и распределение витков:

1 малая катушка 64 × 0,214 = 13,69
2 катушка 64 × 0,25 = 16
3 катушка 64 × 0,268 = 17,152
4 большая катушка 64 × 0,268 = 17,152

Соответственно примем для симметрии 15, 15, 17, 17 (или 14, 16, 17, 17)

Пазы 13 и 14 и далее соответствующие по статору уже заняты двумя слоями двухслойной обмотки. После занятия трехфазной обмоткой всех пазов, согласно правилам построения симметричной обмотки, во всех пазах будет чередование витков 34 – 34 – 30 – 30 – 34 – 34 и так далее. Этого примера нет в таблице готовых данных и данные в таблице не годятся для представленного случая. Таблица готовых данных предпочтительна для одно- двухслойных, однофазных обмоток и использовать данные в таблице 1 следует внимательно применительно к задаче.

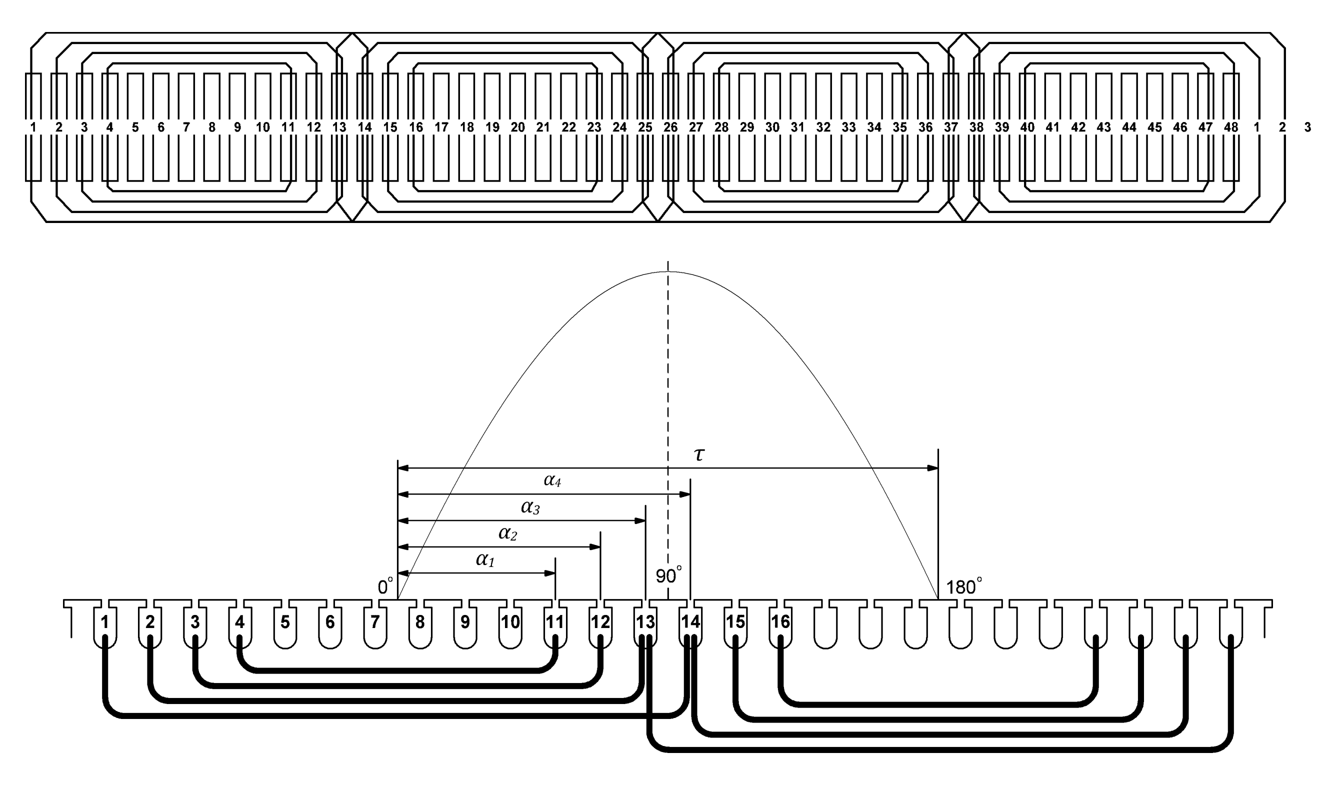


Рис. 8. К примеру 7. Z = 48, 2p = 4, q = 4, обмотка двухслойная,
шаг укороченный, показаны катушечные группы только одной фазы

Пример 8 (рис. 9). Шестиполюсный трехфазный двигатель, обмотка двухслойная, $Z = 54$, $2p = 6$, $q = 3$, средний шаг укороченный $y = 7$ (диаметральный = 9). Две катушки полюсной группы лежат совместно в одном пазе, см. рис. 9, общее количество витков катушечной группы равно N, найдем количество витков каждой катушки для синусного распределения.

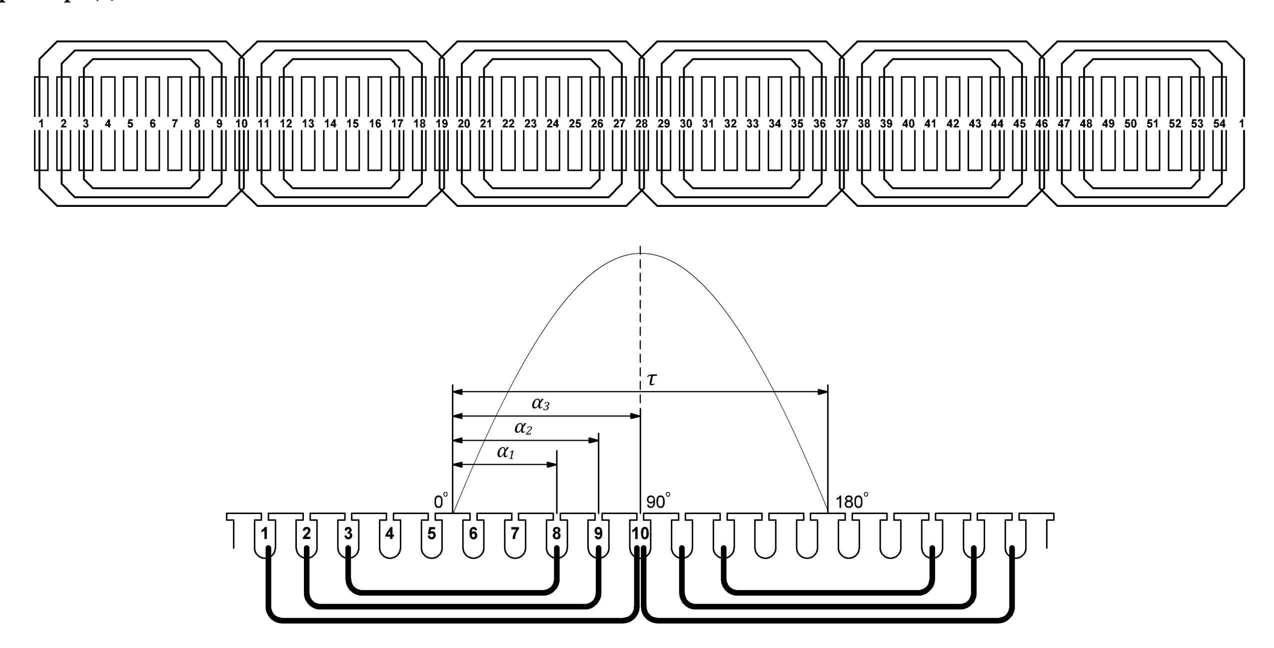


Рис. 9. К примеру 8. $2p = 6$, $Z = 54$, $q = 3$, показаны катушки одной фазы.

Электрический угол занимаемый каждым пазом:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 6}{Z} = \frac{1080°}{54} = 20°$$

Пример полюса на рисунке 9. Электрический угол каждой катушки:

катушка 1, от 3 до 8 паза (шаг 5): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{5}{2} \times 20° = 50°$

катушка 2, от 2 до 9 паза (шаг 7): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{7}{2} \times 20° = 70°$

катушка 3, от 1 до 10 паза (шаг 9): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{9}{2} \times 20° = 90°$

Значение синуса соответствующее каждой катушке:

$\sin 50° = 0{,}7660$, $\sin 70° = 0{,}9396$, $\sin 90° = 1$

Сумма синусоидальных значений группы катушек составляет:

$$0{,}7660 + 0{,}9396 + 1 = 2{,}7056$$

Значение распределения по пазам:

$$\text{катушка 1 } (3 - 8) = \frac{0{,}7660}{2{,}7056} = 0{,}2831 \text{ или } \approx 28{,}3\%$$

$$\text{катушка 2 } (2 - 9) = \frac{0{,}9396}{2{,}7056} = 0{,}3472 \text{ или } \approx 34{,}7\%$$

$$\text{катушка 3 } (1 - 10) = \frac{1}{2{,}7056} = 0{,}3696 \text{ или } \approx 37\%$$

проверка, сумма
28,3 + 34,7 + 37 = 100%

Предположим общее количество N витков катушечной группы 16 витков в одной катушке × 3 = 48 в катушечной группе и распределение витков:

1 малая катушка 48 × 0,2831 = 13,59
2 средняя катушка 48 × 0,3472 = 16,66
3 большая катушка 48 × 0,3696 = 17,74

Соответственно примем 14, 16, 18 (или 15, 16, 17)

Паз 10, центр полюса, и далее соответствующие по статору уже заняты двумя слоями двухслойной обмотки. После занятия трехфазной обмоткой всех пазов, согласно правилам построения симметричной обмотки, во всех пазах будет чередование витков 36 – 30 – 30 – 36 – 30 – 30 (или 34 – 31 – 31 – 34 – 31 – 31) и так далее.

На рис. 10 и 11 показано условно-схематичное, теоретическое для понимания, образование магнитного поля обмотки с равным распределением витков в пазах и с синусным распределением витков. Центрами окружностей, обозначающих магнитное поле, являются пазы с катушками полюса, а их размер – условно величину магнитного поля в соответствии с количеством витков.

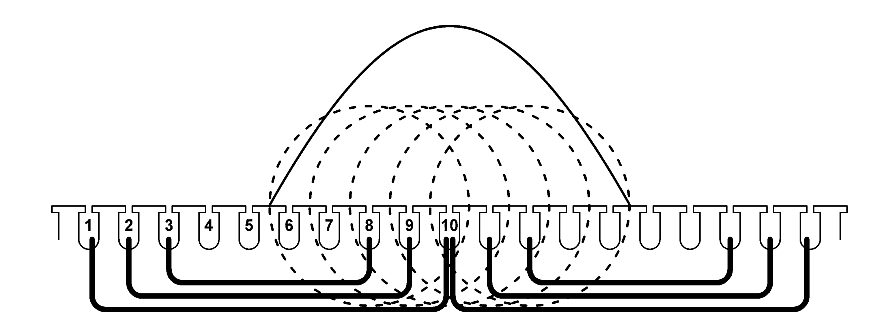


Рис. 10. Условное изображение магнитных полей катушек обмотки с обычным, равным, распределением витков в образовании полюса, окружности полей обозначены пунктиром. Предполагаемая синусная форма поля обозначена сплошной линией.

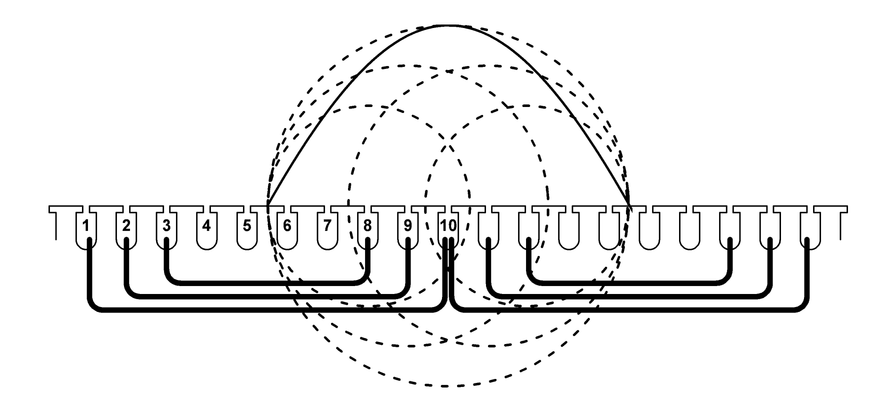


Рис. 11. Условное изображение магнитных полей катушек синусной обмотки в образовании полюса, окружности полей обозначены пунктиром. Синусная форма полюса обозначена сплошной линией.

Пример 8 (рис. 12). Двухполюсный трехфазный двигатель, обмотка двухслойная, Z = 24, $2p$ = 2, q = 4, средний шаг укороченный y = 11 (диаметральный 12). Три катушки полюсной группы лежат совместно в трех пазах, см. рис. 12, количество витков катушечной группы равно N, найдем количество витков катушек в каждом пазе. Электрический угол, занимаемый каждым пазом:

$$\alpha = \frac{180° \times 2p}{Z} = \frac{180° \times 2}{Z} = \frac{360°}{24} = 15°$$

Пример катушек одной фазы на рисунке 12. Электрический угол каждой катушки:

катушка 1, от 4 до 12 паза (шаг 8): $\alpha_1 = \frac{y_1}{2} \times \alpha = \frac{8}{2} \times 15° = 60°$

катушка 2, от 3 до 13 паза (шаг 10): $\alpha_2 = \frac{y_2}{2} \times \alpha = \frac{10}{2} \times 15° = 75°$

катушка 3, от 2 до 14 паза (шаг 12): $\alpha_3 = \frac{y_3}{2} \times \alpha = \frac{12}{2} \times 15° = 90°$

катушка 4, от 1 до 15 паза (шаг 14): $\alpha_4 = \frac{y_4}{2} \times \alpha = \frac{14}{2} \times 15° = 105°$

Значение синуса соответствующее каждой катушке:

sin 60° = 0,8660, *sin* 75° = 0,9659, *sin* 90° = 1, *sin* 105° = 0,9659

Сумма синусоидальных значений группы катушек составляет:

0,8660 + 0,9659 + 1 + 0,9659 = 3,7978

Значение распределения по пазам: $\text{катушка 1 } (4-12) = \frac{0,8660}{3,7978} = 0,228 \text{ или } \approx 22,8\%$

$\text{катушка 2 } (3-13) = \frac{0,9659}{3,7978} = 0,2543 \text{ или } \approx 25,4\%$

$\text{катушка 3 } (2-14) = \frac{1}{3,7978} = 0,2633 \text{ или } \approx 26,3\%$

$\text{катушка 4 } (1-15) = \frac{0,9659}{3,7978} = 0,2543 \text{ или } \approx 25,4\%$

проверка, сумма 22,8 + 25,4 + 26,3 + 25,4 = 99,9%

Предположим общее количество N витков катушечной группы 28 витков в одной катушке × 4 = 112 в катушечной группе и распределение витков:

1 малая катушка 112 × 0,228 = 25,536
2 катушка 112 × 0,2543 = 28,481
3 катушка 112 × 0,2633 = 29,489
4 большая катушка 112 × 0,2543 = 28,481

Три полученнных значения из четырех близки к друг другу. Исходя из принципа образования синусной обмотки – наибольшее количество витков в центре полюса, примем 30 витков для катушки 3, так как она ходится в центре полюса (см. рис. 12). Соответственно примем чередование витков 26, 28, 30, 28, что в сумме 112.
После занятия трехфазной обмоткой всех пазов, согласно правилам построения симметричной обмотки, чередование витков в полюсе получится 52 – 58 – 60 – 58 – 52 и так далее в остальных пазах.

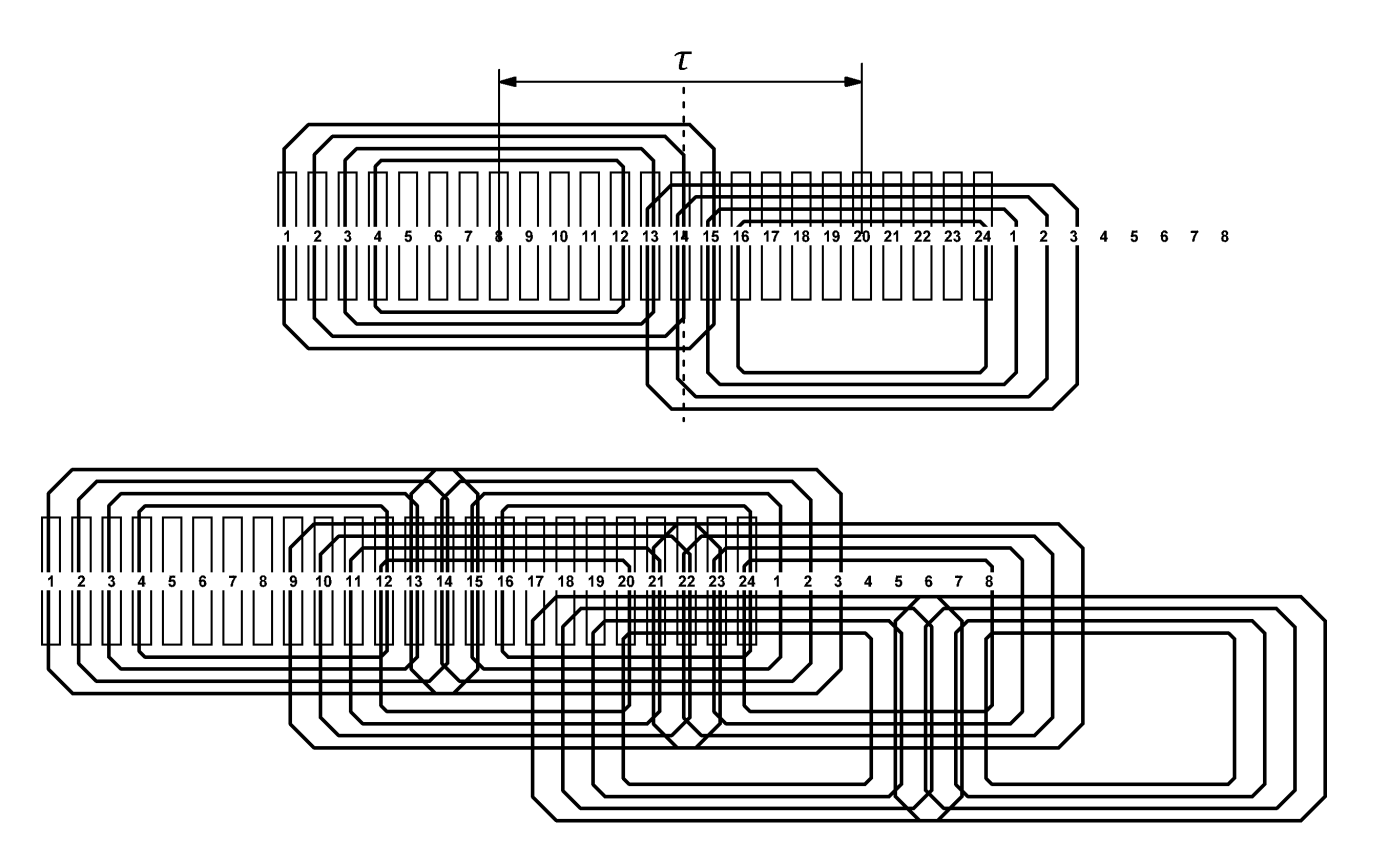


Рис. 12. К примеру 8. Z = 24, 2p = 2, q = 4.
Показано расположение катушек одной фазы и затем всех трех фаз.

Обмоточный коэффициент синусной обмотки.

Обмоточный коэффициент, рассматриваемый как условный *кпд* при создании магнитного поля, является одним из основных значений уравнения расчета обмотки при расчете количества витков на фазу. Для трехфазных, однофазных асинхронных электродвигателей имеющих обычную общепринятую обмотку распределенную по пазам расчет обмоточного коэффициента изложен в соответствующих учебниках и в данном пособии не приводится. Стоит упомянуть, что обмоточный коэффициент состоит из произведения двух коэффициентов, распределения и сокращения шага, в редких случаях может добавляться коэффициент скоса паза при скосе пазов, при расчете короткозамкнутого или фазного ротора. При подсчете обмоточного коэффициента синусной обмотки не используется шаг обмотки и количество пазов на полюс и фазу q и при использование методики для обычной обмотки, с равным одинаковым количеством витков в пазах результат будет ошибочным. При синусной обмотке расчет обмоточного коэффициента происходит иначе. Связано это с бóльшей эффективностью образования магнитного поля при синусном распределении витков по пазам и поэтому величина обмоточного коэффициента при синусном распределении будет заметно больше чем в обычной обмотке. Обмоточный коэффициент при синусном распределении витков есть сумма произведений найденных синусов углов расположения сторон катушек и порядка распределения витков по пазам:

$$kw = k_1 \times sin\, \alpha_1° + k_2 \times sin\, \alpha_2° + \cdots\ k_n + sin\, \alpha_n°$$

где kw – обмоточный коэффициент, k – порядок распределение витков по пазам, sin α – синус угла расположения сторон катушек в статоре.

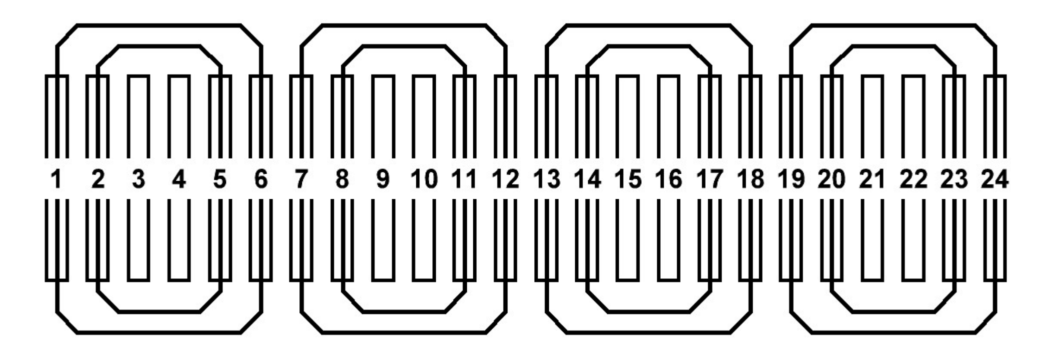


Рис. 13. К примеру расчета обмоточного коэффициента,
$2p = 4$, $Z = 24$, $q = 4$.

Пример на рисунке 13, расчет обмоточного коэффициента.
Полный шаг:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

шаг наибольшей катушки yк = 1 – 6, то есть 5, угол и синус угла:

$$\alpha_1 = sin\left(\frac{yк}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{5}{6} \times 90°\right) = sin75° = 0{,}96592$$

шаг второй катушки 2 – 5, то есть 3, угол и синус угла:

$$\alpha_2 = sin\left(\frac{3}{6} \times 90°\right) = sin45° = 0{,}7071$$

сумма значений: 0,96592 + 0,7071 = 1,67302. Распределение витков:

$$k_1 = \frac{0{,}96592}{1{,}67302} = 0{,}57735 \qquad k_2 = \frac{0{,}7071}{1{,}67302} = 0{,}42264$$

что соответствует позиции 26 в таблице готовых данных указанных на стр. 20. Обмоточный коэффициент:

$$kw = 0{,}57735 \times sin75° + 0{,}42264 \times sin45° = 0{,}55767 + 0{,}29885 = 0{,}8565$$

В этом примере подсчет синусов углов α сделан по иному, но можно равнозначно использовать подсчет как показано на предыдущих страницах с использованием электрического угла приходящимся на паз статора.

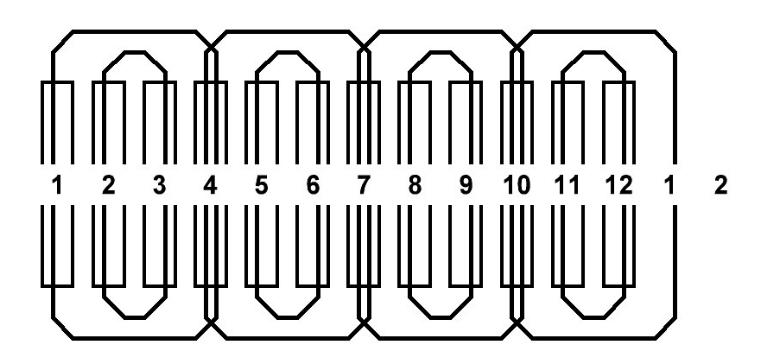


Рис. 14. К примеру расчета обмоточного коэффициента,
$2p = 4$, $Z = 12$, $q = 2$.

Пример на рисунке 14, расчет обмоточного коэффициента.
Полный шаг:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{4} = 3$$

шаг наибольшей катушки *у*к = 1 – 4, то есть 3, угол и синус угла:

$$\alpha_1 = sin\left(\frac{ук}{y} \times 90°\right) = sin\left(\frac{3}{3} \times 90°\right) = sin90° = \frac{1}{2} = 0{,}5$$

шаг второй катушки 2 – 3, то есть 1, угол и синус угла:

$$\alpha_2 = sin\left(\frac{1}{3} \times 90°\right) = sin30° = 0{,}5$$

сумма значений: 0,5 + 0,5 = 1. Распределение витков:

$$k_1 = \frac{0{,}5}{1} = 0{,}5 \qquad k_2 = \frac{0{,}5}{1} = 0{,}5$$

что соответствует позиции 1 в таблице готовых данных указанных на стр. 20. Обмоточный коэффициент:

$$kw = 0{,}5 \times sin90° + 0{,}5 \times sin30° = 0{,}5 \times 1 + 0{,}5 \times 0{,}5 = 1 + 0{,}25 = 0{,}75$$

Важно, обратите внимание, здесь в подсчете обмоточного коэффициента синус угла 90° не разделяется пополам, как требуется при подсчете распределения витков и используется 1. Если бы вышеприведенные примеры имели обычную обмотку, то обмоточный коэффициент для них был бы для 24 пазов 0,6440, для 12 пазов 0,4330, что заметно ниже. Обмоточный коэффициент всегда менее единицы, обычно применяется и считается с точностью до четвертой цифры после запятой. В готовой таблице указаны готовые обмоточные коэффициенты в левом столбце, для большей необходимой точности предлагается сделать подсчет самостоятельно.

Таблица 1. Готовые значения при синусном распределении витков в пазе, (однофазные, одно- или двухслойные).

пп	шаг *y*	тип обм.	Соотношение витков катушек группы в пазе % Количество пазов занимаемых полюсом																			*kw*
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	3	2A	50,0	50,0	50,0	50,0																0,750
2	4	2A	41,4	58,6		58,6	41,4															0,828
3	6	2A	36,6	63,4				63,4	36,6													0,915
4		3A	26,8	46,4	26,8		26,8	46,4	26,8													0,804
5	8	2A	35,2	64,8						64,8	35,2											0,905
6		3A	23,5	43,4	33,1				33,1	43,4	23,5											0,87
7		4A	19,9	36,8	28,0	15,3		15,3	28,0	36,8	19,9											0,796
8	9	2A	34,7	65,3							65,3	34,7										0,960
9		3A	22,7	42,6	34,7					34,7	42,6	22,7										0,893
10		4A	18,5	34,7	28,3	18,5			18,5	28,3	34,7	18,5										0,820
11	12	2A	34,1	65,9										65,9	34,1							0,978
12		3A	21,4	41,4	37,2								37,2	41,4	21,4							0,936
13		4A	16,4	31,8	28,5	23,3						23,3	28,5	31,8	16,4							0,833
14		5A	14,1	27,3	24,5	20,0	14,1				14,1	20,0	24,5	27,3	14,1							0,829
15		6A	13,2	25,4	22,8	18,6	13,2	6,8		6,8	13,2	18,6	22,8	25,4	13,2							0,790
16	16	3A	20,8	40,8	38,4												38,4	40,8	20,8			0,963
17		4A	15,5	30,3	28,5	25,7										25,7	28,5	30,3	15,5			0,929
18		5A	12,7	24,9	23,4	21,1	17,9								17,9	21,1	23,4	24,9	12,7			0,889
19		6A	11,1	21,8	20,5	18,5	15,7	12,4						12,4	15,7	18,5	20,5	21,8	11,1			0,848
20		7A	10,3	20,0	18,9	17,2	14,4	11,3	7,9				7,9	11,3	14,4	17,2	18,9	20,0	10,3			0,812
21	18	4A	15,2	29,9	28,6	26,3												26,3	28,6	29,9	15,2	0,943
22		5A	12,3	24,3	23,2	21,3	18,9										18,9	21,3	23,2	24,3	12,3	0,910
23		6A	10,6	20,9	20,0	18,4	16,4	13,7								13,7	16,4	18,4	20,0	20,9	10,6	0,873
24		7A	9,6	18,9	18,1	16,7	14,7	12,4	9,6						9,6	12,4	14,7	16,7	18,1	18,9	9,6	0,837
25		8A	9,0	17,8	17,0	15,7	13,8	11,6	9,0	6,1				6,1	9,0	11,6	13,8	15,7	17,0	17,8	9,0	0,806
26	5	2B	57,7	42,3			42,3	57,7														0,856
27		3B	50,0	36,6	13,4	13,4	36,6	50,0														0,776
28	7	2B	54,2	45,8					45,8	54,2												0,912
29		3B	41,1	35,1	23,8			23,8	35,1	41,1												0,827
30	8	2B	52,2	47,8						47,8	52,2											0,928
31		3B	39,5	34,8	25,7				25,7	34,8	39,5											0,856
32		4B	34,7	30,6	22,7	12,0		12,0	22,7	30,6	34,7											0,793
33	11	2B	51,8	48,2									48,2	51,8								0,939
34		3B	36,6	34,1	29,3							29,3	34,1	36,6								0,910
35		4B	29,9	27,8	24,0	18,3					18,3	24,0	27,8	29,9								0,855
36		5B	26,8	25,0	21,4	16,5	10,3			10,3	16,5	21,4	25,0	26,8								0,806
37		6B	25,9	24,1	20,7	15,9	10,0	3,4	3,4	10,0	15,9	20,7	24,1	25,9								0,783
38	15	3B	35,1	33,8	31,1											31,1	33,8	35,1				0,947
39		4B	27,6	26,5	24,5	21,4									21,4	24,5	26,5	27,6				0,910
40		5B	23,5	22,6	20,8	18,2	14,9							14,9	18,2	20,8	22,6	23,5				0,869
41		6B	21,1	20,4	18,7	16,4	13,4	10,0					10,0	13,4	16,4	18,7	20,4	21,1				0,829
42		7B	19,9	19,2	17,6	15,4	12,7	9,4	5,8			5,8	9,4	12,7	15,4	17,6	19,2	19,9				0,798
43	17	3B	34,7	33,7	31,6													31,6	33,7	34,7		0,958
44		4B	27,0	26,2	24,6	22,2											22,2	24,6	26,2	27,0		0,927
45		5B	22,7	22,0	20,6	18,6	16,1									16,1	18,6	20,6	22,0	22,7		0,892
46		6B	20,1	19,5	18,2	16,5	14,2	11,5							11,5	14,2	16,5	18,2	19,5	20,1		0,855
47		7B	18,5	17,9	16,8	15,2	13,2	10,6	7,8					7,8	10,6	13,2	15,2	16,8	17,9	18,5		0,821
48		8B	17,6	17,1	16,0	14,5	12,5	10,2	7,5	4,6			4,6	7,5	10,2	12,5	14,5	16,0	17,1	17,6		0,795

тип обмотки: *A* – вместе, *B* – раздельно стороны наибольших катушек, цифра = *q*, см. рис. 2, 3, *шаг y* – шаг наибольшей катушки концентрической группы, *kw* – обмоточный коэффициент.

Таблица 2. Возможность выполнимости синусной обмотки трехфазных электродвигателей (при $q \geq 2$).

количество пазов статора	количество полюсов, $2p$								
	2	4	6	8	10	12	14	16	18
12	+	–	–	–	–	–	–	–	–
18	+	–	–	–	–	–	–	–	–
24	+	+	–	–	–	–	–	–	–
30	+	–	–	–	–	–	–	–	–
36	+	+	+	–	–	–	–	–	–
42	+	–	–	–	–	–	–	–	–
48	+	+	–	+	–	–	–	–	–
54	+	–	+	–	–	–	–	–	–
60	+	+	–	–	+	–	–	–	–
66	+	–	–	–	–	–	–	–	–
72	+	+	+	+	–	+	–	–	–
76	+	–	–	–	–	–	–	–	–
84	+	+	–	–	–	–	+	–	–
90	+	–	+	–	+	–	–	–	–
96	+	+	–	+	–	–	–	+	–
102	+	–	–	–	–	–	–	–	–
108	+	+	+	–	–	+	–	–	+
114	+	–	–	–	–	–	–	–	–

Электромагнитные свойства трехфазных обмоток, с синусным распределением витков и не синусным, можно оценить выполнив анализ магнитодвижущей силы создаваемой этими обмотками, и рассчитав коэффициенты электромагнитной эффективности на основе результатов этого анализа.

Так например, теоретически установлено, что электромагнитный *кпд* однослойной, не синусной трехфазной обмотки одного из исследуемого двигателя 0,9139, а синусоидальной трехфазной обмотки 0,9335, т. е. на 2,1% выше аналогичного коэффициента обмотки с не синусным распределением витков.

В другом случае анализа асинхронного двигателя с синусоидальной трехфазной обмоткой при равной нагрузке фазный ток обмотки статора уменьшился на 6,9%, мощность, отбираемая от электрической сети уменьшилась на 5,0%, потери в двигателе уменьшились на 11,7%, *кпд* увеличился на 2,4%, коэффициент мощности *cosφ* увеличился на 3,4% по сравнению с соответствующими мощностными параметрами того же двигателя с однослойной не синусной обмоткой, рассчитанными на ту же нагрузку. Другие сравнительные примеры приведены в таблице 3 и 4. [Л. 3].

Таблица 3. Пример электротехнических данных электродвигателей с однослойной (обычной) обмоткой, для сравнения в табл. 4.

№	*ток, А*	*Р, на валу, ватт*	*Р, потребляемая, ватт*	*Р, потери, ватт*	*об. мин.*	*момент на валу, Nm*	*η кпд*	*cosφ*
1	1,75	90	405	315	2983	0,586	0,222	0,351
2	2,03	507	840	333	2961	1,93	0,604	0,627
3	2,30	749	1110	361	2945	2,71	0,675	0,731
4	2,70	1008	1410	402	2924	3,61	0,715	0,791
5	3,13	1268	1725	457	2899	4,50	0,735	0,835
6	3,65	1565	2100	535	2870	5,55	0,745	0,872
7	4,13	1760	2370	610	285 1	6,23	0,743	0,869
8	4,98	2064	2805	741	2810	7,38	0,736	0,853

Таблица 4. Пример электротехнических данных электродвигателей с однослойной обмоткой с синусным распределением витков обмотки, к сравнению к табл. 3.

№	*ток, А*	*P, на валу, ватт*	*P, потребляемая, ватт*	*P, потери, ватт*	*об. мин.*	*момент на валу, Nm*	*η кпд*	*cosφ*
1	1,80	153	385	232	2948	0,83	0,397	0,324
2	2,20	917	1215	298	2923	3,31	0,755	0,837
3	2,50	1103	1440	337	2902	3,95	0,766	0,873
4	3,03	1381	1800	419	2868	4,92	0,767	0,900
5	3,35	1523	1995	472	2847	5,45	0,763	0,902
6	3,60	1623	2145	522	2825	5,83	0,757	0,903
7	3,95	1749	2345	596	2798	6,33	0,746	0,899
8	4,50	1937	2655	718	2756	7,08	0,730	0,894

Перед подсчетом синусной обмотки необходимо выявить возможность исполнения, начертив предполагаемою развернутую схему наглядно для определения полюсного деления, центра полюса, для исключения ошибок. Так например схема при $2p = 4$, $Z = 48$, при необходимости по каким-либо конструктивным соображениям, возможно выполнить одно– двухслойно при $q = 3$ ($q = 4$ двухслойная, пример 3) с соответствующим распределением витков.
В однофазных электродвигателях распределение количества пазов статора обычно для основной обмотки ⅔ и вспомогательной ⅓ или пополам, но может быть иным по инженерным соображениям конструктора. Так например в однофазных электродвигателях BO26312, BO6324 и др., на 2 и 4 полюса китайского производства катушечная группа основной обмотки и вспомогательной в статоре на 24 паза занимают полностью все пазы с 1 по 12, ($q = 6$) обмотки выполнена двухслойно "в развалку" с синусным распределением витков, центральная катушка намотана вокруг одного зубца, в таблице 1 готовых значений этот случай 11 – 6В.
Синусные обмотки не получили в настоящее время повсеместного распространения ввиду сложностей технологического характера. Конструктивно, электродвигатели имеющих синусную обмотку и не имеющую ее, ничем не отличаются за исключением самой обмотки.



Литература.

1. Ван Чжаньюань, Ван Нин. China machine press.
"Эксплуатация двигателей переменного тока. Техническое обслуживание и ремонт". 2010 г.
2, Фанг Дацянь, Чжу Чжэнтао и др. China machine press.
"Практическое техническое руководство по обслуживанию электродвигателей". 2018 г. 2-е изд.
3. Jonas Juozas Buksnaitis, Springer International Publishing Switzerland.
"Sinusoidal Three-Phase Windings of Electric Machines". 2016 г.
4. Чжао Цзяли, Machinery Industry press.
"Руководство по ремонту двигателя. Ремонт двигателя малой мощности", 2008 г.